

### Секция 3.

Обеспечение комплексной безопасности зданий и сооружений в современном строительстве

*Алёхин Владимир Николаевич,  
Антипин Алексей Александрович,  
Городилов Сергей Николаевич,  
Храмцов Сергей Владимирович  
Бурков Евгений Александрович  
Коновалова Мария Игоревна*

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВЕТРА НА ВЫСОТНЫЕ ЗДАНИЯ


*Alekhin V.,  
Antipin A.,  
Gorodilov S.,  
Khramtsov S.,  
Burkov E.,  
Konovalova M.*

## NUMERICAL SIMULATION OF WIND LOADS ON HIGH RISE BUILDINGS

sapros\_ustu@mail.ru

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

**23-24 апреля 2014 года  
Екатеринбург**



*В статье представлена методика численного моделирования воздействий ветра на высотные здания. Расчет ветрового давления на высотные здания выполняется в пакете ANSYS. Результаты работы применены при определении ветрового давления на ряд строящихся в г. Екатеринбурге высотных зданий. Исследуемое здание помещается в домен, который представляет собой численный аналог аэродинамической трубы. Размеры домена выбираются таким образом, чтобы у его границ не было искривления воздушных потоков от помещенных в него зданий. Для моделирования течения воздуха применена модель Shear stress transport (SST). Для численного решения уравнений используется метод конечных элементов.*

*Article presents a methodology of the numerical simulation of the wind on high-rise buildings. Paper includes the results of researches on development of a technique of determination of wind pressure upon high-rise buildings by means of numerical modeling in an ANSYS package. The results are applied to calculation of wind pressure upon a number of high-rise buildings under construction in Yekaterinburg City (Russia). The simulated building is placed in a domain that is the numerical analogue of wind tunnel. Domain sizes are chosen in such a way that simulated buildings do not affect the flow of air on its boundaries. Shear stress transport (SST) turbulence model has been used. For the numerical solution of the governing equations the finite volume method was used (FVM).*

**Ключевые слова:** высотное здание, воздействие ветра, моделирование, ветровые нагрузки.

**Keywords:** high-rise building, wind impact, simulation, wind loads.

## **Введение**

Ветровые воздействия на высотные здания относятся к группе основных нагрузок. Исследования аэродинамики занимают значительную часть в общем объеме проектных работ. Как показали оценки специалистов, для зданий выше 200 м ветер (соответствующий VI ветровому району РФ) опаснее для общей прочности, чем девятибалльное землетрясение.

Согласно существующей нормативной документации [1, 2, 3] вопросы аэродинамики отражают специфику ветровых воздействий на высотные здания в недостаточной степени. Поэтому, приходится применять экспериментальные и численные методы, к которым относятся: мониторинг и натурные замеры; испытания в аэродинамической трубе и численное моделирование. В настоящее время, быстрыми темпами развивается численное моделирование, основанное на методе конечных элементов (МКЭ).

В последние 10-15 лет бурно развивается вычислительная гидрогазодинамика (CFD), совершенствуются технологии расчетов ветровых воздействий на здания и сооружения при неуклонно возрастающей мощности компьютеров. Ведущие зарубежные исследовательские и проектные организации все чаще комбинируют испытания и «численные» эксперименты. В

перспективе роль математического моделирования, как показал опыт в смежных отраслях (например, аэрокосмической) и задачах (строительная механика), будет только возрастать.

Целью работы является определение средней и пульсационной составляющих ветровой нагрузки в рамках заданного объекта проектирования. Для создания численного аналога ветровой трубы требуется выполнить следующие шаги: выбор математической модели задачи и модели турбулентности; создание домена и построение сетки конечных элементов; назначение граничных условий.

### Математическая модель

Ниже приведены уравнения для несжимаемого потока воздуха, использованные в математической модели[4]:

– уравнение Рейнольдса:

$$\rho \frac{dV}{dt} = -grad \left( p + \frac{2}{3} \mu_{\Sigma} div V \right) + 2 Div(\mu_{\Sigma} \dot{S}) \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $p$  – статическое давление,  $\mu_{\Sigma} = \mu + \mu_t$ ,  $\mu$  – коэффициент вязкости,  $\mu_t$  – коэффициент турбулентной вязкости,  $V$  – скорость,  $\dot{S}$  – тензор скоростей деформаций.

– уравнение неразрывности:

$$div(V) = 0. \quad (2)$$

Для решения дифференциальных уравнений (1, 2) используется метод конечных объемов. Применена «гибридная» модель турбулентности SST (shear stress transport, модель передачи напряжений сдвига), которая сочетает устойчивость стандартной  $k-\omega$  модели в пристеночных областях и эффективность  $k-\epsilon$  модели в пространстве домена с гладким сопряжением между ними. Такая модель соответствует принятым в мировой практике [5].

### Вычислительная модель и граничные условия

Высотное здание и окружающие его объекты помещаются в домен, который является аналогом аэродинамической трубы. Размеры домена выбираются таким образом, чтобы движение воздуха у стенок домена было ламинарным. Экспериментальными исследованиями установлено, влияние здания высотой  $H$  сохраняется на расстоянии до  $10H$ . Размер домена в направлении потока должен быть не меньше  $5H$ . Расстояние за объектами рекомендуется применять не меньше  $15 - 20 H$  [6, 7]. Минимальные размеры домена показаны на рис. 1 [6].

На рис. 2 приведен домен, использованный при расчете ветрового давления на строящуюся башню Исеть в г. Екатеринбурге. Граничные условия на внешних стенках домена приняты следующими: верхние и боковые грани – «OPENING» (поток воздуха может быть направлен как внутрь, так и из домена); со стороны набегающего потока воздуха – «INLET»

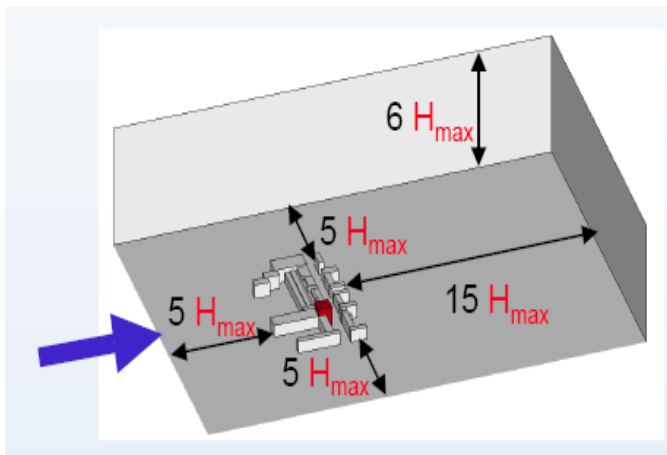


Рис. 1. Минимальные размеры домена (H – высота высотного здания)

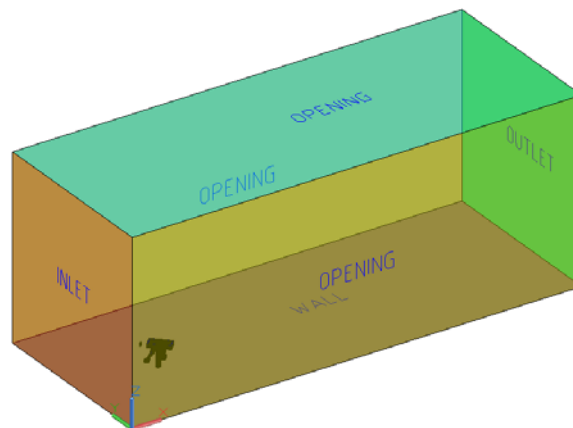


Рис. 2. Схема домена

(поток направлен внутрь домена); на противоположной стороне – «OUTLET» (поток направлен из домена); на нижней грани используется граничное условие «WALL» - на нем может быть задана шероховатость поверхности, с помощью которой можно учесть невысокие здания, не включенные в расчетную модель, деревья и т.п. Рекомендуемое значение шероховатости для городских районов – 2 [8].

Распределение скоростей на поверхности «INLET» принимается по метеорологическим данным. Начальные значения скоростей ветра и их распределение по высоте при расчете высотных зданий в г. Екатеринбурге нами приняты в виде степенного закона [9]:

$$V(z) = V_{ref} \cdot 1,7 \cdot (z/Z_D)^\alpha, \quad (3)$$

где  $V(z)$  – скорость ветра (м/сек) на высоте  $z$  (м);  $V_{ref}$  – скорость ветра на высоте 10м,  $Z_D$  – параметр, зависящий от высоты и плотности окружающей застройки.

Для территории г. Екатеринбурга ( $V_{ref} = 23 - 13$  м/с;  $\alpha = 0,27$ ;  $Z_D = 550$ ) распределение скоростей ветра по высоте соответствует отечественным нормам [1].

Закон изменения скорости ветра по времени принят на основании [6]

$$V = V(z) (1 + 0.25 \sin(\omega \cdot t)), \quad (4)$$

где частота  $\omega = 2 \pi / 5$ , а 5с – время одного колебания (получено на основе численных экспериментов). Для нестационарных расчетов шаг по времени принимается 1с при общей продолжительности – 100с.

Параметры воздуха приняты следующими: температура 25°C, плотность – 1,185 кг/м<sup>3</sup>, молярная масса - 28.96 кг/кмоль. Численными экспериментами было показано, что при высоте 100 – 200 м параметры воздуха незначительно изменяются.

Геометрия высотного здания, для которого определяется давление, моделируется по возможности точно, а геометрия других объектов, включенных в домен – приблизительно.

В качестве пример описано определение ветровых нагрузок на 52-х этажное здание «Башня Исеть» в г. Екатеринбурге. Высота здания – 209 м. Здание состоит из двух основных



Рис. 3. Район "Екатеринбург - Сити" (проект)

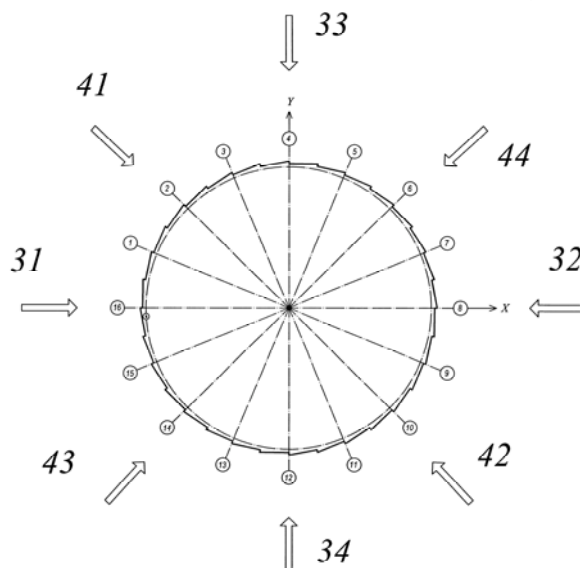


Рис. 4. Сечение круглой части здания. Стрелки с номерами показывают учитываемые в расчете направления ветра. Высота ребер – 700мм

частей: жилая часть (52 надземных этажа) и подземная часть с парковкой и техническими службами. На рис. 3 показан проектируемый район «Екатеринбург – Сити». Желтым цветом показана «Башня Исеть». Сечение верхней (круглой) части здания показано на рис. 4. Поверхность круглой части здания – ребристая (высота ребра – 700 мм).

Продувка модели здания в аэродинамической трубе была выполнена фирмой «WACKER INGENIEURE» (Германия). Масштаб модели – 1/380. В связи с мелким масштабом потребовалось уточнить распределение ветрового давления на внешние поверхности здания и их воздействия на каркас.

Использована сетка конечных элементов в виде тетраэдров, у поверхности здания (граничные условия типа «Wall») использованы призмы. Вблизи границ домена размер стороны конечного элемента – 100 м., около поверхности здания – 0,5 м. На рис. 5 приведена сетка конечных элементов вблизи поверхности здания.

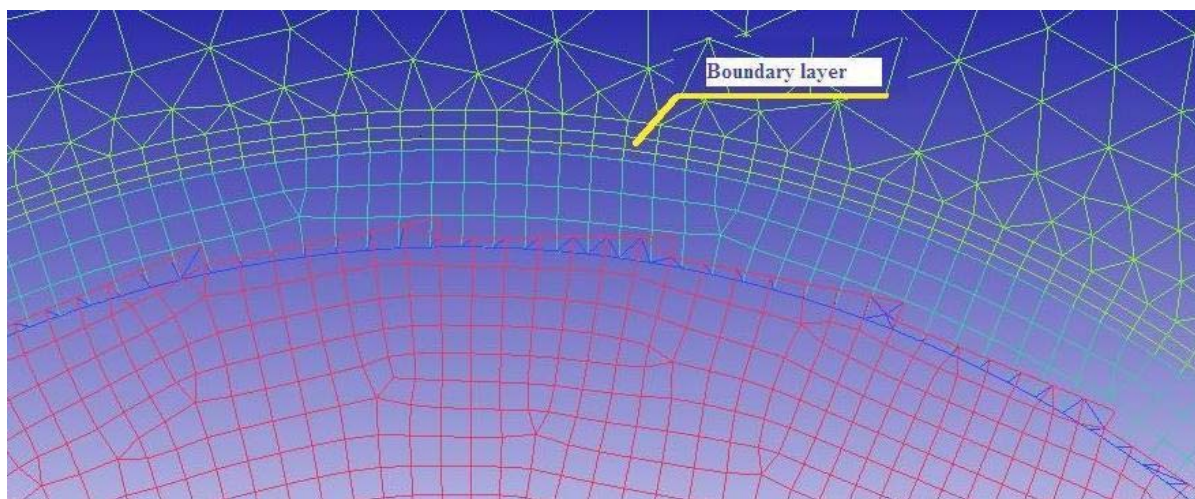


Рис. 5. Пограничный слой



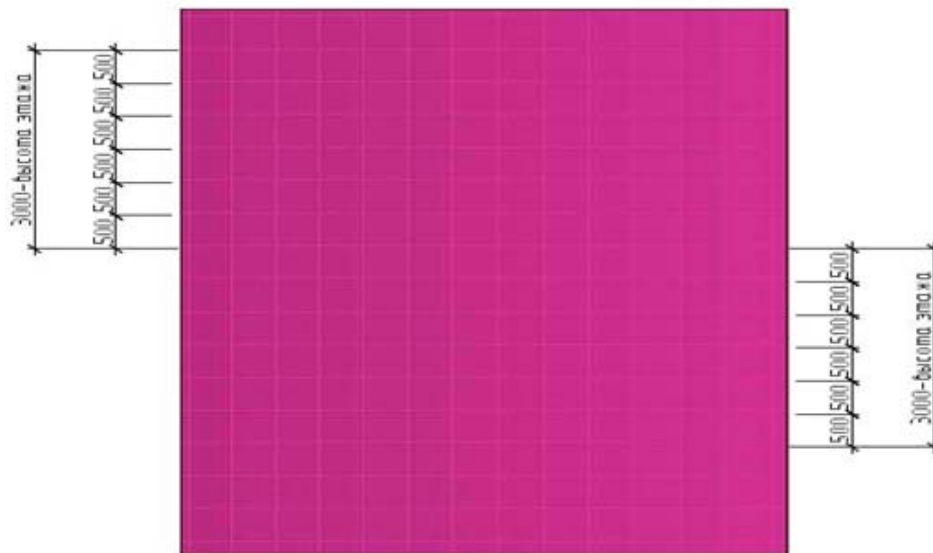


Рис. 6 Сетка конечных элементов на части стены здания

При моделировании сетки конечных элементов на поверхности здания требуется принимать 2-3 конечных элемента на 1 м поверхности. Ячейки сетки на поверхности зданий, включенных в домен, приняты, в основном, квадратными, так как они минимизируют ошибки осреднения. На рисунке 6 показано, что в пределах высоты этажа на поверхности здания располагалось 6 конечных элементов  $0,5 \times 0,5$  м.

#### Результаты вычислений

Выполнен стационарный расчет. Результаты стационарного расчета уточнены решением не стационарной задачи. На рис. 7 показано характерное распределение давления ветра по высоте здания. На рис. 8 показано распределение скоростей ветра на высоте 58,5 м.

Распределение давления ветра на внешние поверхности здания с помощью специально разработанного программного обеспечения было приведено к эпюрам давления ветра на

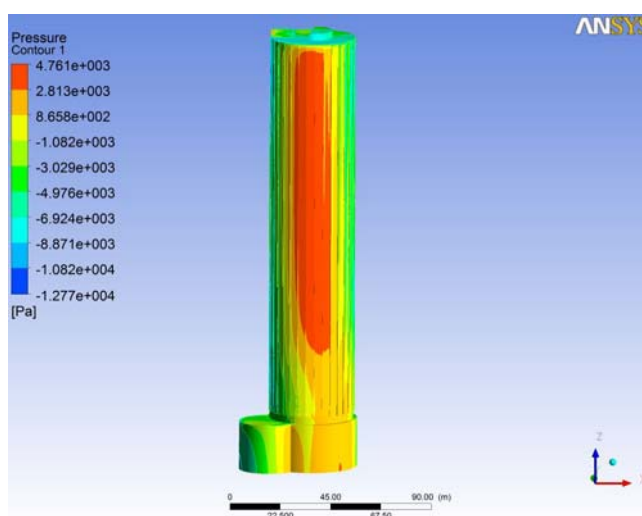


Рис. 7. Распределение давления ветра на поверхность здания

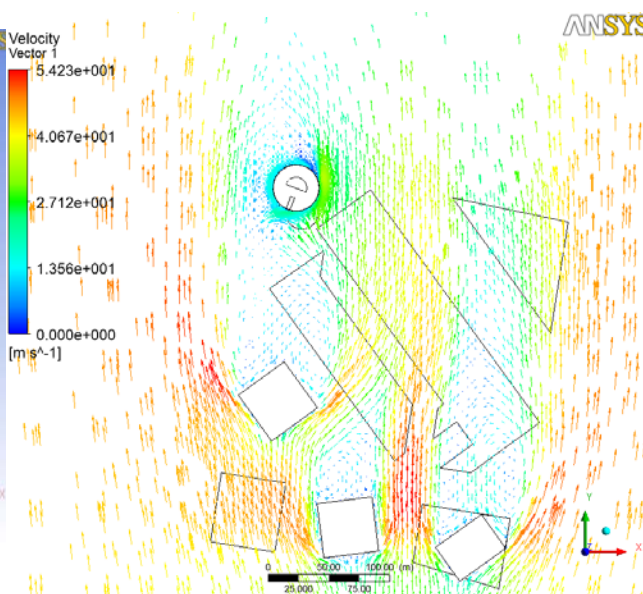


Рис. 8. Распределение скоростей ветра вокруг зданий на высоте 58.5 м

перекрытия и передано как нагрузка на расчетную модель каркаса здания (рисунок 9). Использование двух расчетных моделей здания (внешних поверхностей и каркаса) вызвано ограниченностью ресурсов используемых компьютеров. Если использовать условие автоматической передачи данных, то в расчетной модели каркаса здания можно использовать лишь объемные конечные элементы.

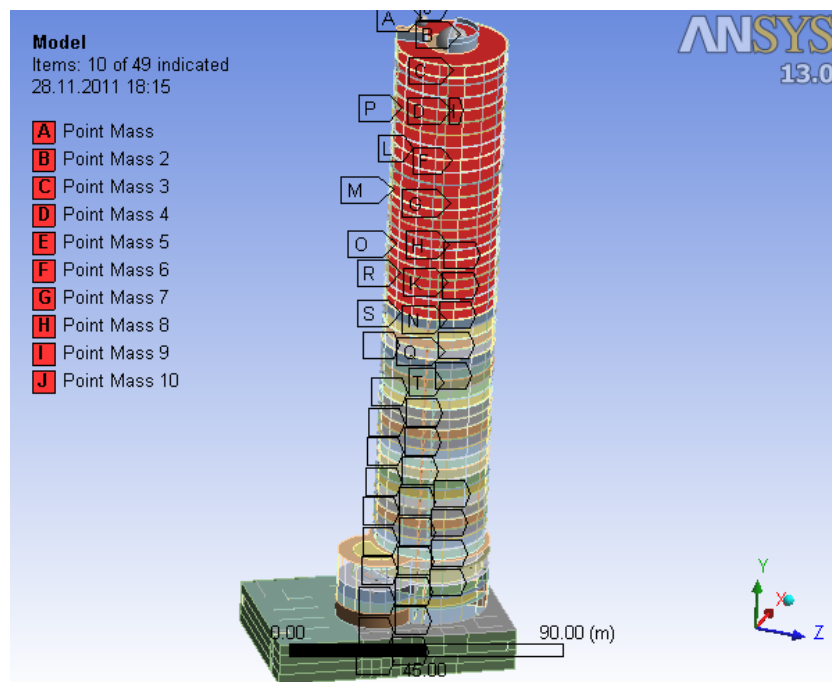


Рис. 9. Расчетная модель каркаса здания

В расчетной модели каркаса здания использованы стержневые и пластинчатые конечные элементы.

На рис. 10 показаны типовые графики средней и пульсационной составляющей давления ветра на поверхности здания.

Полученные результаты расчета сравнивались с экспериментальными данными: значениями результирующих сил от давления ветра, приложенным к центру тяжести верхней круглой части здания.

Опыт расчетов ветровых давлений на высотные здания показывает, что использование экспериментальных данных вкупе с

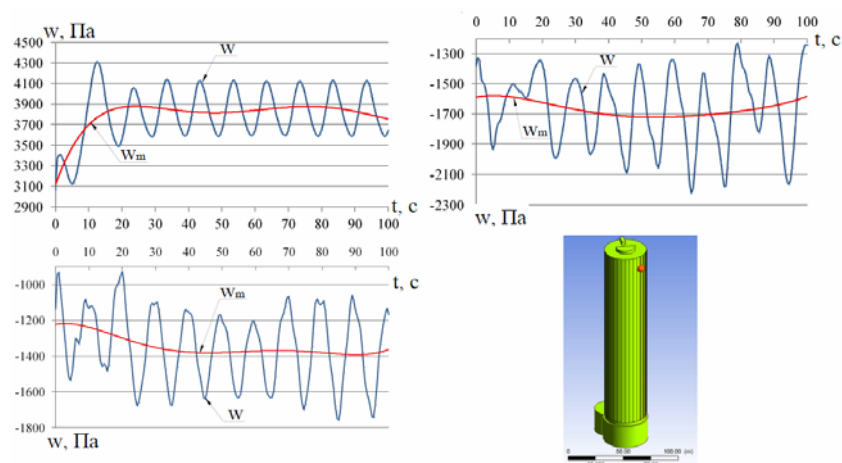


Рис. 10. Графики суммарного ветрового давления, средней и пульсационной составляющих для точки на поверхности здания, обозначенной красным цветом

расчетными дает более обоснованные величины нагрузок. С одной стороны, при проведении испытаний продувкой моделей в аэродинамических трубах не удастся соблюсти все необходимые критерии подобия [10], с другой стороны, численные результаты на настоящем этапе требуют экспериментальной проверки.

## **Заключение**

Численный анализ давления ветра на высотные здания показывает:

- результаты численного анализа и экспериментального определения ветра качественно совпадают;
- различие расчетных и экспериментальных данных во многом объясняется различными компьютерными моделями зданий, использованных для определения частот собственных колебаний. Полученные численно и экспериментально максимальные ветровые нагрузки хорошо совпадают;
- в результате исследований можно сделать вывод о том, что при проектировании высотных зданий и уникальных сооружений необходимо как проведение численного, так и аэродинамического эксперимента.

## **Благодарность**

Авторы благодарят А.С. Носкова и А.В. Хаита за ценные замечания и обсуждение результатов.

## **Библиографический список**

- СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия. / Госстрой России.— М.: ГУП ЦПП, 2001.—44 с.
- EN 1991-1-4. (1994). Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 1: "Basis design". CEN, 232p.
- British Standard, Loadings for Buildings - Part 2: Code of Practice for Wind Loads (1995). Building and Civil Engineering Sector Board, UK.
- Loytsyanskiy L.F. (2003). Liquid and gas mechanics. Moscow, Drofa, 840 p.
- Florian R. Menter (2009). Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 23, No. 4, p. 305–316.
- Dubinsky S.I. (2010). Numerical Modeling of wind effects on tall buildings and complexes (in Russian). PhD Thesis, Russia, Moscow, 231p.
- Hrvoje Kozmar. (2011). Wind-tunnel simulations of the suburban ABL and comparison with international standards. Wind and Structures, Vol. 14, No. 1, p. 15-34.
- E. Simiu, R. Skandlan. (1984). The effect of wind on buildings and structures. Stroyizdat, Moscow, p.568
- AIJ Recommendations for Loads on Buildings (1996). Architectural Institute of Japan, Japan.
- E. J. Plate (1982). Engineering Metrology, Chapter 13, Elsevier, Netherlands, , p. 573-639.